

4. Остриков, О.М. Дислокационная макроскопическая модель клиновидного двойника / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006, № 2. – С. 10–18.
5. Косевич, А.М. О дислокационной модели двойникования / А.М. Косевич, Л.А. Пастур // Физика твердого тела. – 1961. – Т.3, №4. – С. 1291–1297.
6. Новиков, И.И. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки / И.И. Новиков, Розин К.М.. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.

Материал поступил в редакцию 10.10.11

OSTRIKOV O.M. Pressure condition at a surface of a crystal, the deformable distributed loading, at presence wedge kind the twin

The design procedure of fields of pressure in the elastic semi space deformed by loading distributed on a surface at presence wedge kind of the twin is developed. It is established that the normal distributed loading conducts to redistribution of shift pressure at the twin so that they have a various sign at different borders of the twin. Tangential external pressure increase the general level of pressure at the twin, leading to their redistribution in such a manner that they have one sign at different borders of the twin.

УДК 621.9 06-192:620.1

Омесь Д.В., Горбунов В.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТОЙКИ КОНСОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

Введение. Значительную долю парка металлообрабатывающего оборудования составляют многоцелевые станки с числовым программным управлением (ЧПУ), обладающие высокой производительностью и гибкостью в условиях серийного производства. В общем парке многоцелевых станков наиболее распространены компоновки с неподвижной вертикальной стойкой, жестко закрепленной на плите или отливаемой заодно с ней, крестовым или консольным столом, горизонтальным или вертикальным шпинделем, который в свою очередь может обладать дополнительными степенями свободы и быть расположенным внутри или вне стойки.

Большую группу обрабатываемых деталей на многоцелевых станках составляют корпусные детали, которые являются составной частью почти всех машин и механизмов. Точность отдельных поверхностей корпусов достигает 5...6 квалитета, также предъявляются высокие требования к точности формы и взаимного расположения поверхностей. Учитывая высокие требования по точности обработки корпусных деталей, многоцелевые станки должны иметь высокий уровень точности, и при более высоких требованиях к точности станков необходимо производить коррекцию их погрешностей в процессе обработки.

Точность обработанной детали зависит от таких параметров станка, как его геометрическая и кинематическая точность, виброустойчивость, теплостойкость, точность позиционирования (для станков с ЧПУ). Геометрическая точность определяет точность взаимного расположения узлов станка, точность траектории движения исполнительных органов. Главным фактором, приводящим к снижению геометрической точности станка, являются тепловые деформации его базовых деталей. Из-за повышенной энергоемкости многоцелевых станков с ЧПУ через 3...4 часа после начала работы тепловые деформации могут достигать значительных величин (до 0,1 мм и выше) [1].

Детали несущей системы станка подвержены наибольшему тепловым деформациям, так как имеют значительные размеры и теплопроводящие поверхности. Тепловые деформации станка приводят к отклонению взаимного положения инструмента и заготовки, в результате чего увеличиваются погрешности формы и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, а также снижается точность размеров этих поверхностей. Доля тепловых погрешностей прецизионных станков может составлять 40...70% общей погрешности обработки.

Постановка задачи. При переменных режимах работы станка смещения рабочих органов в результате влияния тепловых деформаций его базовых деталей имеют большой диапазон рассеяния, переменны во времени, носят случайный характер, зависят от мно-

гих факторов, не поддаются точному расчету, что усложняет применение различных методов определения и компенсации температурных погрешностей.

Источниками тепловыделения в станке являются подшипниковые опоры, механические передачи, электрооборудование, процесс резания (особенно при черновой обработке), элементы гидросистемы и др. Теплота от этих источников распределяется между деталями станка неравномерно, что приводит к искажению геометрической формы базовых деталей.

Обработка деталей на многоцелевых станках характеризуется чередующимися режимами резания, – частота вращения шпинделя, подача и глубина резания, следовательно, происходит изменение сил резания. В этом случае мощности источников тепловыделения будут величинами переменными. Силы резания создают дополнительные моменты трения в подшипниковых опорах и вызывают дополнительное тепловыделение в механических передачах. Таким образом, в деталях несущей системы станка формируются нестационарные тепловые поля.

Для повышения точности обработки и надежности многоцелевых станков с ЧПУ в межлагодочный период необходимо осуществлять диагностирование тепловых деформаций базовых деталей станка и принимать меры для их компенсации и снижения влияния на точность обработки.

Поскольку прямое измерение величины температурных смещений элементов станка в процессе эксплуатации затруднено, необходимо применять другие методы. В связи с развитием вычислительной техники широкое применение при описании термоупругих процессов, происходящих в станках, получили численные методы: – физическое и математическое моделирование, основанное на методе теплового подобия, метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ), метод конечных разностей (МКР).

При термоупругих расчетах деталей, имеющих сложную и неправильную форму, наиболее приемлемым среди численных методов является МКЭ, реализованный в отдельных программных модулях. Поэтому предлагается применить компьютерное моделирование термоупругих процессов, протекающих в стойке консольно-фрезерного станка в условиях работы под нагрузкой.

Методика исследования. При исследовании рассматривается работа многоцелевого станка в межлагодочный период, когда производится механическая обработка партии деталей «Корпус». Согласно типовому технологическому процессу обработка всех поверхностей детали выполняется на нескольких единицах оборудования. Операция технологического процесса, выполняемая на многоцеле-

Омесь Дмитрий Владимирович, магистр, ассистент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета.

Горбунов Виктор Петрович, к.т.н., зав. кафедрой машиноведения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

вом станке с ЧПУ, является наиболее концентрированной. За один установ на станке обрабатывается большинство поверхностей. При обработке в течение операции происходит смена режимов резания, чередуются черновые и чистовые проходы.

Согласно методике, предложенной в [2], для определения величины смещения оси шпинделя в результате тепловых деформаций стойки станка применяется моделирование термоупругих процессов на ЭВМ. Адекватность результатов моделирования подтверждена экспериментально. Трехмерная модель должна быть максимально приближена к форме и размерам стойки исследуемого станка. Тепловыделение от процесса резания по данной методике не учитывается.

Одним из этапов моделирования является определение граничных условий при создании тепловой модели. В исследовании, описанном в [2], рассматривалась работа станка на холостом ходу. Однако в условиях работы под нагрузкой мощность источников тепловыделения будет выше. Поэтому определение граничных условий для создания тепловой модели осуществляется в следующей последовательности:

1. Определение радиальной составляющей силы резания, приводящей к дополнительной нагрузке в подшипниковых опорах шпинделя, увеличению сил трения в них и, соответственно, большему тепловыделению.
2. Расчет радиальной силы действующей на подшипниковые опоры, согласно расчетной схемы нагружения шпинделя поперечными силами.
3. Определение момента трения в подшипниках шпинделя и учет дополнительного момента, возникающего в результате приложенных поперечных составляющих сил резания, при обработке поверхностей детали.
4. На основании кинематических, силовых и геометрических характеристик привода главного движения определяются мощности источников тепловыделения, тепловые потоки, направленные в стойку и смазочную жидкость.

При моделировании термоупругих процессов стойки предлагается использовать два варианта задания граничных условий:

- прикладывать тепловые потоки от источников в виде временных ступенчатых функций с учетом их величины и продолжительности действия;
- задавать средние значения действующих тепловых потоков за период одного цикла обработки (в течение одной операции).

Первый вариант более трудоемкий из-за большого объема ввода данных и относительно длительного процесса машинного расчета, его целесообразно применять при исследовании колебания температур и тепловых деформаций в пределах одного цикла обработки. Второй способ менее трудоемок и применим при исследовании тепловых деформаций в течение межпериодического периода, когда цикл обработки повторяется многократно. В любом случае, точность расчета выше при меньшем значении временного интервала.

Результаты исследования и обсуждение. Как было отмечено выше, в парке многоцелевых станков наиболее распространена компоновка с вертикальной стойкой, несущей шпиндельный узел. Такую компоновку имеют многоцелевой станок модели MC12-250, консольно-фрезерный станок модели 6Т80Ф3, станок Орша-Ф32ВФ3. Объектом исследования выбрана вертикальная стойка станка 6Т80Ф3, так как изменение ее формы и размеров в результате тепловых деформаций приводит к линейному и угловому смещению оси шпинделя.

Технологический процесс обработки детали «Корпус» содержит концентрированную операцию, содержание которой приведено в табл. 1.

Согласно кинематической схемы привода главного движения и режимов обработки в течение операции по методике [3] рассчитаны мощности источников тепловыделения с учетом влияния сил резания. Тепловые потоки в стойку станка определены по методике [4]. В течение рассматриваемой операции тепловые потоки от источников в стойку изменяются ступенчато. На рис. 1 приведен график изменения теплового потока в передней опоре шпинделя. Для каждого источника тепловыделения построены аналогичные графики, которые являются граничными условиями при создании тепловой модели стойки и определении ее теплового поля.

Таблица 1

Содержание технологических переходов	Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	Мощность резания, кВт	Основное время, мин
1. Фрезеровать переднюю плоскость	560	2,3	3,9
2. Расточить два отверстия Ø100Н7 предварительно	800	1,9	0,4
3. Расточить два отверстия Ø100Н7 предварительно	1120	1,3	1,8
4. Расточить два отверстия Ø100Н7 окончательно	1600	0,3	2,6
5. Сверлить семь отверстий под резьбу М8Н7	560	0,3	0,8
6. Нарезать резьбу М8Н7 в семи отверстиях	100	1,6	0,5
7...12. Повернуть и произвести аналогичную обработку с другой стороны	-	-	-

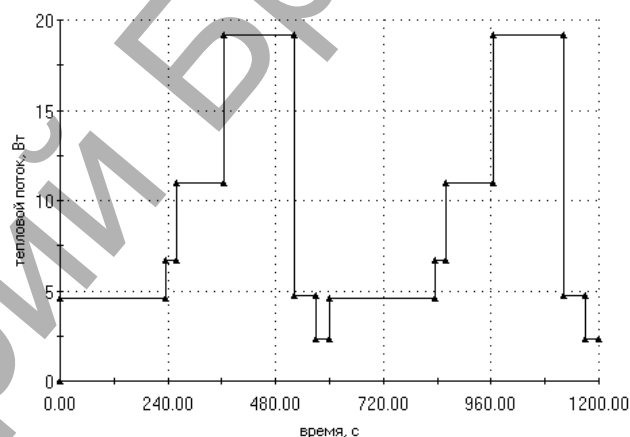


Рис. 1. Тепловой поток в стойку в передней опоре шпинделя в течение выполнения одной операции

Можно сделать вывод, что мощность источников тепловыделения главным образом зависит от частоты вращения шпинделя и промежуточных валов коробки скоростей.

Нестационарное тепловое поле стойки является граничным условием для дальнейшего термоупругого расчета — определения тепловых деформаций. Кривые изменения во времени температуры в передней опоре и смещения оси шпинделя вдоль оси Y (вылет $\Delta z=0$) в течение выполнения на станке последовательно двух операций показаны на рис. 2, 3.

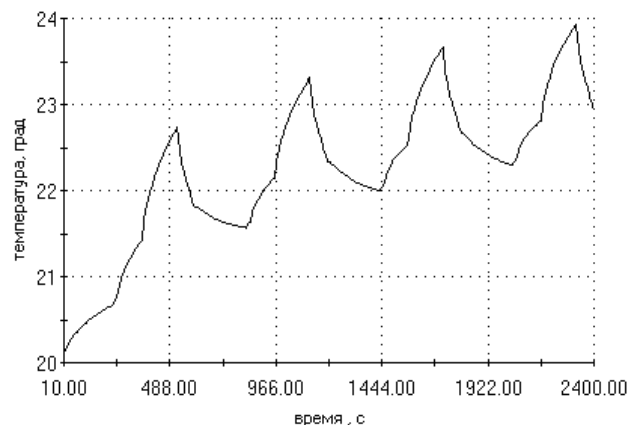


Рис. 2. Температура передней опоры шпинделя в интервале времени $0 < \tau < 40$ мин

Пики температуры соответствуют переходам технологического процесса, когда шпиндель вращается с наибольшей частотой $n=1600 \text{ мин}^{-1}$. Ввиду инерционности твердого тела при тепловом деформировании колебание величины смещения оси шпинделя незначительные (см. рис. 3).

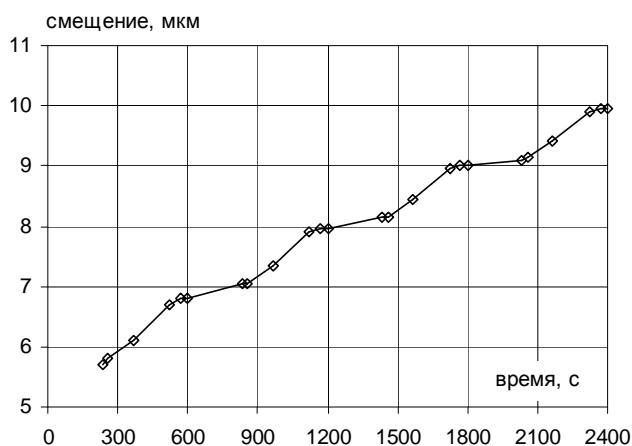


Рис. 3. Смещение оси шпинделя вдоль оси Y в интервале времени $0 < \tau < 40 \text{ мин}$

Среди множества точек компьютерной термоупругой модели стойки точки поверхности передней опоры шпинделя подвержены наибольшим изменениям температуры. Поэтому при диагностировании величины смещения оси шпинделя в качестве диагностирующего сигнала следует принять температуру передней опоры.

После обработки последовательно двух деталей температура передней опоры шпинделя достигнет $\theta=23^\circ\text{C}$, в результате тепловой деформации стойки смещение оси шпинделя на вылете $\Delta z=150 \text{ мм}$ составит $\Delta Y=10,8 \text{ мкм}$, угловое смещение $\Delta \varphi=1,1''$. Угловое смещение оси шпинделя является следствием разности температур передней и задней стенок, приводящей к искажению формы стойки.

Для определения характера изменения смещения оси шпинделя при работе станка в течение смены $\tau=8 \text{ ч}$ применим второй вариант задания граничных условий, когда ко всем граничным поверхностям модели приложены усредненные по величине значения тепловых потоков. На рис. 4 показана кривая смещения шпинделя в течение смены при обработке партии деталей.

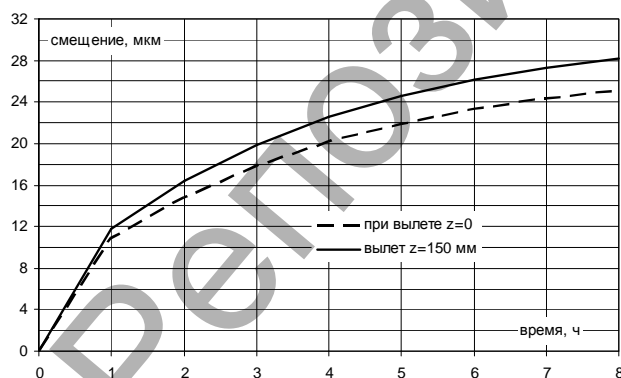


Рис. 4. Кривая смещения во времени оси шпинделя вдоль оси Y при различной величине вылета

График зависимости смещения оси шпинделя на вылете инструмента $\Delta z=150 \text{ мм}$ от температуры в передней опоре приведен на рис. 5. По нему можно диагностировать величину смещения при известной температуре передней опоры шпинделя.

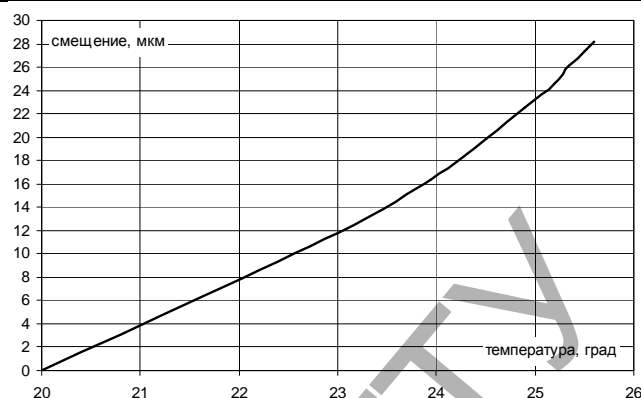


Рис. 5. График зависимости смещения оси шпинделя от температуры в передней опоре при вылете $\Delta z=150 \text{ мм}$

Форма кривой смещения (см. рис. 4) подчиняется экспоненциальному закону. Стабилизации тепловых деформаций на исследуемом промежутке времени не происходит, можно наблюдать лишь снижение интенсивности. Максимальная величина смещения оси шпинделя $\Delta Y=28,2 \text{ мкм}$ при температуре в передней опоре $\theta=25,6^\circ\text{C}$. В связи с появляющимся угловым смещением оси шпинделя $\Delta \varphi$ величина смещения может меняться в зависимости от вылета инструмента. В пределах рассматриваемого интервала времени доля углового смещения оси шпинделя достигает 3 мкм при вылете инструмента $\Delta z=150 \text{ мм}$.

Заключение. 1. Предложена методика построения термоупругой модели в зависимости от требуемой детальности определения тепловых полей и деформаций, при которой тепловые потоки можно задавать с полной детализацией при каждой смене режимов работы в пределах одной операции, либо задавать их усредненное значение за период одного цикла обработки.

2. Определено тепловое поле стойки станка и характер изменения во времени смещения оси шпинделя с учетом изменяющихся режимов обработки, как в течение одной операции технологического процесса, так и за межналадочный период. Установлена зависимость смещения от температуры в передней опоре шпинделя. Наибольшее смещение оси шпинделя при вылете $\Delta z=150 \text{ мм}$ составило $\Delta Y=28,2 \text{ мкм}$ при температуре в передней опоре $\theta=25,6^\circ\text{C}$, при этом угловое смещение оси составило $\Delta \varphi=4,2''$.

3. С помощью моделирования термоупругих процессов можно диагностировать и прогнозировать изменение геометрической точности многоцелевого станка в межналадочный период, связанное с тепловыми деформациями его базовых деталей.

4. На основании зависимости смещения оси шпинделя от температуры в передней опоре можно вносить изменения в управляющую программу устройства ЧПУ с помощью команд коррекции положения инструмента.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / Под ред. А.С. Проникова. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.
2. Горбунов, В.П. Анализ тепловых деформаций стойки многоцелевого станка с числовым программным управлением / В.П. Горбунов, Д.В. Омель // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. – №4(64): Машиностроение. – С. 36–39.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3-х т. / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др.]; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – Т. I: Проектирование станков. – 444 с.
4. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А.Н. Резников, Л.А. Резников – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

Материал поступил в редакцию 24.10.11

OMES D.V., HARBUNOU V.P. Thermal strains simulation of the milling machine tool rack

The technique of simulation of the thermoelastic processes occurring in the milling machine tool rack at alternating conditions of machining is offered. As a result of a thermal strain of a rack occurs linear and an angular displacement of the spindle axis, leading to drop of machining accuracy. Computer simulation is applied to diagnosing of thermal strains magnitude of a rack because direct method of strains measurements are complicated.

At calculation of sources power of a thermal emission change of cutting conditions during machining of each detail, and also variable cutting forces is considered. The thermoelastic model of the machine tool rack allows to define with an exactitude high scale magnitude of displacement of a spindle axis at known temperature in its front bearing part.

УДК 621.833.3:681

Благодарный В.М., Дремук В.А.

ЧЕРВЯЧНЫЕ КОЛЕСА С НАКЛАДНЫМИ ДЕМПФЕРАМИ

Введение. Червячные редукторы являются одними из важнейших элементов приводов многих машин, например, таких как грузоподъемные машины, краны, лифты и т.п. Обычно две трети стоимости привода приходится на червячный редуктор, который после отказа привода, как правило, приходится заменять на новый. Работают в этих машинах червячные редукторы в чрезвычайно напряженных условиях. Частые пуски, остановки, реверс и нередкие перегрузки приводят к увеличению динамических нагрузок, и, как следствие, к довольно быстрому выходу червячного редуктора из строя. При этом основной причиной отказов червячных редукторов является износ рабочих поверхностей зубьев и витков червячной пары. Несмотря на применение совершенных и качественных смазок, полностью предотвратить износ не удается. В статье анализируются причины появления динамических нагрузок, приводящих червячную пару к износу, и даются некоторые рекомендации по их уменьшению.

Основные сведения о червячных передачах. Червячные передачи предназначены для редуцирования скорости при передаче энергии между перекрещивающимися осями, главным образом под углом 90°. Редукторы с червячными передачами широко применяют в приводах различных машин. В приводах кранов, лифтов и других подъемно-транспортных устройств червячные редукторы работают в сложных условиях. Большие переменные нагрузки, частые пуски и остановки, реверс – все это вызывает значительный износ рабочих поверхностей зубьев червячных колес и приводит к потере работоспособности редукторов. Вопросы повышения работоспособности червячных редукторов весьма актуальные и важные. Одним из путей повышения их работоспособности является улучшение свойств смазки, обеспечивающей благоприятные условия работы червячной передачи с точки зрения повышения износостойкости рабочих поверхностей зубьев колес и витков червяков, а также демпфирующей способности, противостоящей ударным импульсам, возникающим при пусках, остановках и реверсе. Считается, что определенный слой смазки, находящийся в контакте между зубом колеса и витком червяка, не только уменьшает коэффициент трения при скольжении поверхностей, но и демпфирует в определенной степени возникающие динамические нагрузки. Демпфирующая способность смазки зависит от ее вязкости и толщины слоя. Сорт смазки влияет на коэффициент трения, наиболее низкие величины коэффициента трения получены у смазок, основанных на растительных маслах. Увеличение вязкости смазки влияет на коэффициент трения подобно увеличению скорости скольжения. С возрастанием вязкости повышается доля жидкостного трения в контакте, но одновременно увеличивается сила вязкого сдвига, определяющая коэффициент жидкостного трения. В результате коэффициент трения падает. С увеличением вязкости смазки растут потери на взбалтывание масла, что ведет к снижению коэффициента полезного действия. При отсутствии в червячной передаче чисто жидкостного трения коэффициент трения будет являться функцией нагрузки, увеличиваясь с ее возрастанием. Резкое увеличение коэффициента трения начинается вследствие возникновения начальной формы заедания в виде повышенного износа зубьев червячного колеса. Основной вид смазки, применяемый в червячных передачах, – смазка окуноманием в масляную ванну червяка и червячного колеса. Смазка окуноманием или поливанием применяется при окружных скоростях червяка по дели-

тельному цилиндру до 10 м/с вне зависимости от того, что окунается: червяк или червячное колесо.

Червячные передачи имеют много общего с зубчатыми передачами, они тоже относятся к передачам зацеплением, поэтому все, что относится к свойствам зацепления, характерно и для червячных передач. Но есть и существенные отличия червячных передач от зубчатых. Например, если в зубчатых передачах с эвольвентным зацеплением в полюсе зацепления наблюдается лишь относительное качение рабочих поверхностей зубьев колес, то в червячных передачах даже в полюсе зацепления будет лишь скольжение. Червячные передачи отличаются большей плавностью работы по сравнению с зубчатыми за счет того, что в зацеплении находится большее число зубьев колеса, то есть коэффициент перекрытия у червячных передач значительно больше. Как уже было отмечено выше, в червячных передачах поверхности зубьев колес скользят по виткам червяка, поэтому зубчатый венец червячного колеса должен быть изготовлен из антифрикционного материала и должна быть обязательно обеспечена хорошая смазка передачи. Именно в направлении улучшения свойств материалов червячной пары и смазки направлены все усилия инженеров и исследователей [1].

В отличие от зубчатых передач, где вопросам динамики посвящено значительное число работ [3] и где указаны конкретные меры по уменьшению или даже устранению явлений, связанных с динамикой передачи, в червячных передачах так остро вопрос о динамике не поставлен [2].

Традиционным считается решение проблемы уменьшения трения между рабочими поверхностями зубьев колеса и витков червяка всевозможными методами, но в основном подбором материалов пары, их термообработкой и улучшением смазки [1, 4]. Такая точка зрения оправдана в том случае, если червячные редукторы работают в спокойном режиме, без частых пусков и остановов, без реверса. Известно также, и это было отмечено в работе [3], что при пуске нагрузка в передаче увеличивается в 2–3 и более раз по сравнению с номинальной. Это наблюдается также и при реверсивном движении передачи. В этом случае никакая смазка, за исключением твердой, не в состоянии предотвратить локальный контакт рабочих поверхностей зубьев колеса с витками червяка. Смазка выдавливается из зоны контакта, собираясь вокруг него. Происходит упругая и, возможно, некоторая пластическая деформация рабочей поверхности зуба колеса. А так как в это же время происходит скольжение поверхностей в локализованном контакте при высокой нагрузке, возникает температурная вспышка, размягчение материала, увеличение молекулярных сил сцепления из-за высокого контактного давления и, как следствие, заедание. Чаще всего червячные передачи выходят из строя по причине износа зубьев червячного колеса, обусловленного заеданием рабочих поверхностей червячной пары.

Исходя из представленной картины зацепления червячной передачи, можно сделать вывод о двух фазах, происходящих в процессе зацепления зуба червячного колеса с витком червяка. Первая фаза – это удар рабочей поверхности витка червяка о рабочую поверхность зуба червячного колеса, вторая фаза – это относительное скольжение рабочих поверхностей витка червяка и зуба колеса.

В зубчатых передачах удар зубьев пытаются смягчить с помощью конструктивных решений, то есть выполняя зубчатые колеса с пониженной виброактивностью [5]. Как показали исследования, бла-

Благодарный В.М., Дремук В.А. Барановичский государственный университет.

Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская область, г. Барановичи, ул. Войкова 21.